

688693

单层厂房排架非线性分析与设计

赵传智 编著

武汉工业大学出版社

单层厂房排架非线性分析与设计

赵传智 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

武汉工业大学出版社

内 容 简 介

对单层厂房排架柱的非线性弹塑性工作性能及破坏机理,国内外均较少研究。本书是作者多年来从事单层厂房钢筋混凝土排架结构试验研究的成果。对单层厂房钢筋混凝土铰接排架的工作性能及破坏机理有新的认识,所提分析、设计方法适用、合理。书中除简要介绍钢筋混凝土结构非线性分析与设计的基本原理外,还有大量的实验分析资料、作者所提的单厂排架非线性分析方法、电算源程序及实用设计方法、设计实例等。全书内容分为:概论、二阶弹性分析、二阶弹塑性分析、试验及工程实例分析、设计方法、实用程序。

本书对从事土建工作的教学、科研、设计与施工人员均有理论意义与实用价值。且可作为结构类专业高年级学生和研究生选修课(或必修课)教材或参考书。

单 层 厂 房 排 架 非 线 性 分 析 与 设 计

赵 传 智 著

武汉工业大学出版社出版发行
新华书店 湖北发行所 经销
湖南省华容县国营印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 16.125 字数: 35千字

1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数 1—1050本

ISBN 7-5629-0167-8/TU·0015 定价: 8.00元

前 言

钢筋混凝土是一种非弹性、非线性的复合材料。由这种材料所制成的结构物，在各类作用下，尤其是在接近承载能力的极限状态时，均呈现出明显的非弹性、非线性反应。因此，钢筋混凝土结构的分析与设计，应建立在非弹性、非线性的理论基础之上。

钢筋混凝土结构的非线性分析与设计，早在40年代，已开始研究。近廿年来，随电子计算机的发展与运用，在非线性的分析方面，进展迅速；但在非线性设计方面，因问题的复杂性，及设计人员的习惯影响，仍停滞于理论研究阶段，成果用于实践，并纳入各国设计规范、规程的则较少。本书是作者多年来从事钢筋混凝土单层厂房排架结构试验研究的成果，是钢筋混凝土结构非线性分析与设计这一科学领域中的一个重要组成部分。

单层厂房钢筋混凝土铰接排架在我国运用极为广泛。过去，对此类结构的认识，仅限于其工作的弹性阶段；在设计中，也仅对排架作一阶弹性分析及弹性稳定分析，以确定排架柱的内力与计算长度，并对柱截面进行考虑纵向弯曲的强度计算。对单层厂房排架柱的非线性弹塑性工作性能及破坏机理，国内、外均较少研究。

本书内容共分为六章：

第一章概论，简述结构各类非线性分析与设计方法，钢筋混凝土塑性铰与超静定钢筋混凝土结构内力重分布的基本原理；非线性问题的基本数值解法等。

第二章二阶弹性分析，主要介绍了两种排架二阶弹性分析方法——矩阵力法与矩阵位移法。压弯杆弹性稳定理论的基本方程及单厂排架柱的计算长度等。

第三章二阶弹塑性分析，内容包括钢筋混凝土材料的本构方程，钢筋混凝土偏心压杆的轴力—弯矩—曲率关系及排架两种二阶弹塑性分析方法——矩阵力法及矩阵位移法等。

第四章试验及工程实例分析。介绍了著者所进行的各类单跨、多跨排架的试验结果并列举了大量工程实例的电算分析。据此，对排架的破坏机理、极限承载能力、刚度裂缝及内力重分布等均进行了深入的探讨，并指出了现行设计方法存在的问题及其原因分析。

第五章设计方法，除简要地介绍了目前国外钢筋混凝土柱的各种非线性设计方法外，并提出了作者所建议的三种设计方法：即修正排架柱计算长度的一阶弹性分析法；修正排架柱刚度的二阶弹性分析法及等高排架的弯矩调幅法等，可供工程界实用参考。

第六章实用程序，共介绍了作者所编制的四个电算程序，即钢筋混凝土柱截面轴力—弯矩—曲率关系分析程序；单柱二阶非线性分析程序；单厂排架柱的二阶非线性分析程序及单厂排架柱计算长度分析程序等。这些程序适用于IBM微机，可直接用于工程实践。

同济大学蒋大骅教授对本书的研究及论述，曾多次给予指导和帮助。武汉工业大学李桂青教授，湖南大学成文山教授，西安冶金建筑学院王崇昌教授等均审阅了本书。武汉冶金建筑专科学校周育媛、黄秀芬工程师对本书的排架试验及电算做了大量工作。作者统此致谢。

因水平所限，对书中存在的问题，热忱期望读者批评指正。

赵传智

1988年12月

目 录

1、概论

1.1 各种分析方法概述

1.1.1 一阶弹性分析	(1)
1.1.2 二阶弹性分析	(3)
1.1.3 一阶刚——塑性分析	(3)
1.1.4 二阶刚——塑性分析	(4)
1.1.5 一阶弹——塑性分析	(4)
1.1.6 二阶弹——塑性分析	(5)
1.1.7 一阶弹塑性分析	(5)
1.1.8 二阶弹塑性分析	(6)

1.2 轴力对截面抗弯强度的影响

1.2.1 偏压截面的 N_e-M_e 相关图	(6)
1.2.2 轴力对刚——塑性分析的影响	(8)
1.2.3 轴力对弹——塑性分析的影响	(9)

1.3 塑性铰与内力重分布

1.3.1 两种塑性铰	(12)
1.3.2 塑性铰的长度	(13)
1.3.3 塑性铰的极限转角	(15)
1.3.4 内力重分布	(16)

1.4 强度破坏与失稳

1.4.1 单柱的强度破坏与失稳	(20)
1.4.2 单厂排架柱的强度破坏与失稳	(21)

1.5 非线性问题的基本数值解法

1.5.1 割线刚度法(变刚度全量法)	(25)
1.5.2 切线刚度法(变刚度增量法)	(27)
1.5.3 初刚度法(等刚度增量法)	(29)

1.6 非线性设计方法概述

1.6.1 分析与设计	(30)
1.6.2 基本准则	(30)
1.6.3 极限状态	(31)
1.6.4 方法类型	(32)

1.7 研究概况	
1.7.1 超静定钢筋混凝土结构	(34)
1.7.2 单层厂房铰接排架	(36)
2. 二阶弹性分析	
2.1 排架柱的二阶弹性分析—矩阵力法	
2.1.1 基本假定	(39)
2.1.2 基本结构与基本方程	(39)
2.1.3 基本方程的迭代求解	(41)
2.1.4 电算程序框图	(45)
2.2 排架柱的二阶弹性分析—矩阵位移法	
2.2.1 基本假定与基本方程	(46)
2.2.2 压弯杆的几何非线性微分方程	(46)
2.2.3 考虑P— Δ 效应的单元刚度矩阵	(48)
2.2.4 考虑P— Δ 效应的等效节点荷载列阵	(50)
2.2.5 运算过程	(51)
2.3 压弯杆挠度曲线及内力的一般方程	(52)
2.4 排架柱的计算长度	
2.4.1 概述	(55)
2.4.2 失稳柱的稳定方程	(56)
2.4.3 支承柱的柔度系数	(58)
2.4.4 考虑厂房结构的整体空间作用	(59)
2.4.5 试验排架及工程实例分析	(59)
3、二阶弹塑性分析	
3.1 材料本构关系的数学模式	
3.1.1 钢筋	(63)
3.1.2 混凝土	(66)
3.2 钢筋混凝土偏压截面的轴力—弯矩—曲率关系 (数值法)	
3.2.1 基本假定	(72)
3.2.2 截面条带的划分	(75)
3.2.3 计算步骤与程序框图	(78)
3.3 钢筋混凝土偏压截面的轴力—弯矩—曲率关系 (解析法)	
3.3.1 大偏心受压截面	(80)
3.3.2 小偏心受压截面	(87)
3.3.3 大、小偏心受压的界限	(88)

3.3.4	轴力—弯矩—曲率图中的下降现象	(89)
3.4	矩阵力法	
3.4.1	力学模型	(91)
3.4.2	程序框图	(92)
3.4.3	弹塑性变形协调方程	(95)
3.4.4	考虑厂房空间作用	(96)
3.5	矩阵位移法	
3.5.1	基本假定	(97)
3.5.2	基本方程	(98)
3.5.3	单元刚度矩阵与几何刚度矩阵	(98)
3.5.4	总刚及总向量的形成	(101)
3.5.5	边界条件的处理	(103)
3.5.6	基本方程的求解	(103)
3.5.7	程序框图	(104)
4	试验及工程实例分析	
4.1	单跨排架的试验与分析	
4.1.1	试验概况	(106)
4.1.2	试验结果及其分析	(107)
4.2	双跨排架的试验与分析	
4.2.1	试验概况	(109)
4.2.2	试验结果及其分析	(110)
4.3	微粒混凝土等高三跨排架的试验与分析	
4.3.1	试验概况	(117)
4.3.2	试验结果及其分析	(119)
4.4	工程实例分析	
4.4.1	金工车间PJ18	(120)
4.4.2	装配车间PJ21-18	(122)
4.4.3	大板车间PJ21-18-18	(123)
4.4.4	铆焊车间PJ21/15	(125)
4.5	结论及评述	
4.5.1	破坏机理	(126)
4.5.2	承载能力	(127)
4.5.3	刚度与裂缝	(128)
4.5.4	内力重分配	(128)
4.5.5	原因分析	(130)

5、设计方法

5.1 修正排架柱计算长度的一阶弹性分析

5.1.1 修正排架柱的计算长度 (133)

5.1.2 实例设计 (136)

5.2 修正排架柱刚度的二阶弹性分析

5.2.1 基本假定 (137)

5.2.2 分析步骤与例题 (139)

5.3 单层厂房排架的最不利组合荷载 (154)

5.4 调整排架柱截面弯矩的一阶弹性分析(调幅法)

5.4.1 基本原理 (165)

5.4.2 单跨排架的调幅 (166)

5.4.3 多跨(等高)排架的调幅 (173)

5.4.4 塑性铰极限转角的验算 (178)

5.4.5 排架极限承载能力验算 (179)

5.5 国外设计方法简介

5.5.1 弯矩增大系数法 (186)

5.5.2 模型柱法 (189)

5.5.3 $N-\Delta$ 法 (195)

6、实用程序

6.1 单层厂房排架二阶弹塑性分析程序

6.1.1 程序性能 (204)

6.1.2 主要符号 (204)

6.1.3 源程序 (205)

6.1.4 应用说明 (217)

6.2 单层厂房排架柱计算长度分析程序

6.2.1 简要说明 (225)

6.2.2 主要符号 (226)

6.2.3 源程序 (226)

6.3 柱截面轴力~弯矩~曲率关系分析程序

6.3.1 程序说明 (230)

6.3.2 源程序 (231)

6.4 单柱二阶非线性分析程序

6.4.1 程序说明 (233)

6.4.2 源程序 (235)

I、概 论

1.1 各种分析方法概述

结构分析的目的在于寻求在各类作用下，结构的真实反应（内力、变形等），为正确合理的结构设计，提供数据信息。在外荷载作用下，结构的反应主要取决于其几何特征及材料性能；因对此两者所作的假设不同，形成各种分析方法；现以图1.1所示单跨铰接排架为例，简要介绍如下：

1.1.1 一阶弹性分析

在这种分析方法中，假设材料为线弹性；在建立静力平衡方程时，不考虑结构几何形状的改变。因假设材料为线弹性，则杆件的刚度 EI 为常量，不因外载或内力的增、减而改变，杆件截面的弯矩——曲率（ $M-\varphi$ ）关系（ $\varphi = M/EI$ ）是线性的，如图1.2中OA所示。因平衡方程是按结构变形前的轴线建立的，与结构的位移无关，则杆件内力为荷载的一次函数，故称为“一阶”（First order）或“几何线性”（Geometrical linear）。

对图 1.1所示单跨排架，按一阶弹性分析，横杆的轴力为

$$X = 0.352T^{(1)} = 0.0176P \quad (1.1)$$

A柱任意截面的弯矩为

$$M = X(H-x) = 0.0176P(H-x) \quad (1.2)$$

柱顶的侧移为

$$\Delta = \frac{XH^3}{3EI} = 0.00587P \frac{H^3}{EI} \quad (1.3)$$

式中 EI ——柱截面的抗弯刚度（ E 为混凝土的弹性模量， I 为柱截面惯性矩）

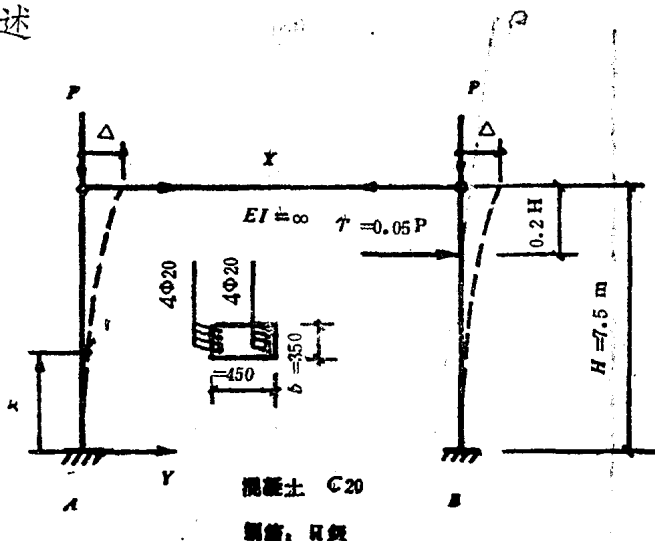


图1.1 单跨铰接排架

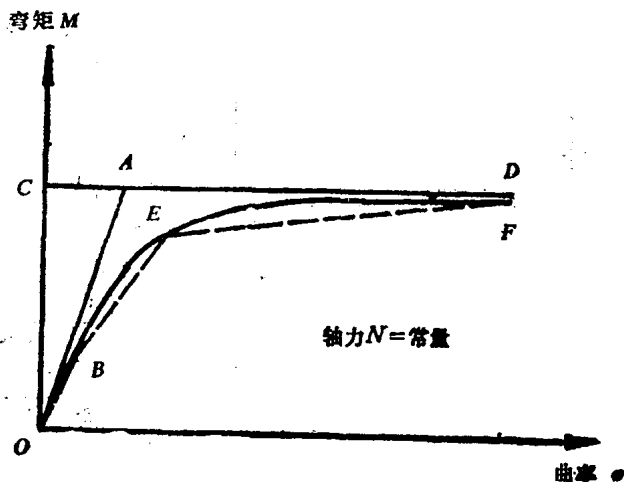


图1.2 各种分析方法采用的M-φ图形

OA———、二阶弹性分析
OCD———、二阶刚——塑性分析
OAD———、二阶弹——塑性分析
OBEF（曲线）———、二阶弹性分析
OBEF（三折线）———、二阶弹塑性分析

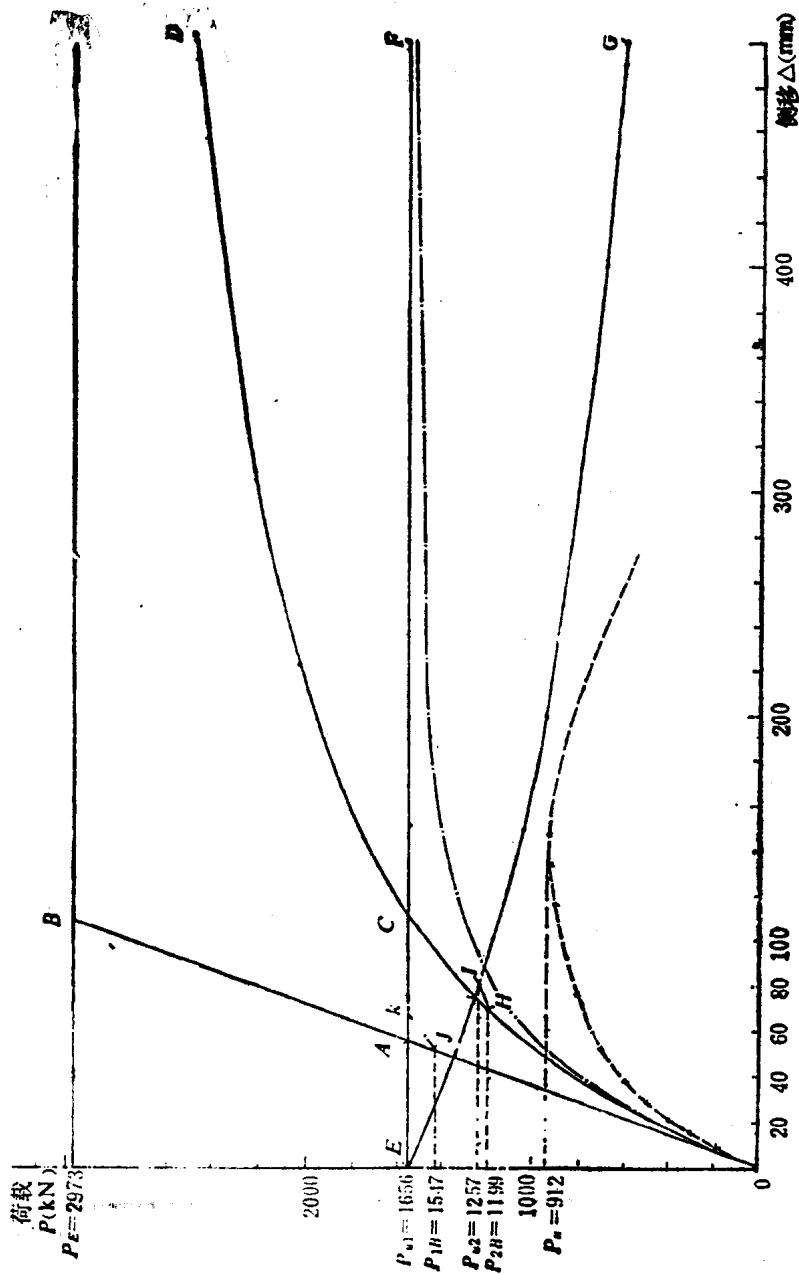


图1.3 各种分析方法的P~ Δ 曲线

- | | | | | | |
|------|-----|--------|------|-----|--------|
| OAB | —— | 二阶弹性分析 | OCD | —— | 二阶弹性分析 |
| OEF | —— | 塑性分析 | OEG | —— | 塑性分析 |
| OJKF | —— | 二阶弹性分析 | OHIG | —— | 二阶弹性分析 |
| --- | --- | 二阶弹性分析 | --- | --- | 二阶弹性分析 |

Δ 与 P 之间成线性关系,如图1.3中的直线 OAB 所示。

一阶弹性分析的方法简便,在结构处于小变位及弹性工作阶段的情况下,不致引起过大的误差,目前广泛用于各类结构(包括单层厂房铰接排架)。

1.1.2 二阶弹性分析

在二阶弹性分析中,仍取材料为线弹性的假设,故其截面的 $M \sim \varphi$ 关系仍如图1.2中的直线 OA 所示;但静力平衡方程是按结构变形后的轴线建立的, $P \sim M$ 间不再为线性关系,故称这种分析方法为“二阶”(second order)或“几何非线性”(Geometrical non-linearity)分析。按此,则:

横杆的轴力近似为

$$X = 0.0176P^*$$

A柱任意截面的弯矩为

$$M = X(H - x) + P(\Delta - y) \quad (1.4)$$

柱顶的侧移为⁽²⁾

$$\Delta = \frac{XH^3}{3EI} \cdot \frac{3(\operatorname{tg} u - u)}{u^3} \quad (1.5)$$

$$\text{其中 } u = H \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

可见, Δ 与 P 之间不再是线性关系,如图1.3中的曲线 OCD 所示。

当荷载 P 值趋近于柱的欧拉临界荷载

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{(2H)^2} = \frac{\pi^2 \times 25.5 \times 2.658 \times 10^9}{(2 \times 7500)^2} = 2973 \text{ kN}$$

u 值趋近于 $\frac{\pi}{2}$,则 Δ 值趋近于无穷大,故曲线 OCD 以 $P = P_E$ 的水平线为渐近线。

1.1.3 一阶刚——塑性分析

在这种分析方法中,假定柱截面弯矩 M 达极限值 M_u (在定值的轴力 P 下)前,截面为刚性的,无转动($\varphi = 0$);当 $M = M_u$ 时,截面为塑性的,即在保持弯矩为定值 M_u 的情况下,可继续转动,故称此截面为“塑性铰”(plastic hinge)。截面的 $M \sim \varphi$ 关系由竖直及水平两线段所组成,如图1.2中的 OCD 所示。

对图1.1所示单跨排架,柱底截面的弯矩最大,当其值达 M_u 而形成两个塑性铰时,排架变为可动机构而不断侧移,此时排架所能承担的荷载,称为“极限荷载”(ultimate load) P_{u1} 。

按一阶分析的定义, P_{u1} 值可不考虑排架的侧移,按静力平衡条件计算如下(见图1.1):

* 在二阶弹性分析中,因排架A、B二柱的变形曲线、二阶弯矩及二阶曲率的不同,横杆轴力 X 与按一阶弹性分析值应有所不同,见1、3、4。

由柱B

$$0.8HT - XH = M_u$$

及柱A

$$XH = M_u$$

可得

$$M_u = 0.4HT = 0.02P_{u1}H \quad (1.6)$$

钢筋混凝土偏心受压截面的极限弯矩 M_u 与轴力 P_{u1} 有关, 故上式需迭代求解。可得 (见1.2.2)

$$P_{u1} = 1656 \text{ kN}$$

排架柱顶侧移 Δ 与荷载 P 之间的关系, 由竖直的及水平的两线段所组成, 见图1.3中的OEF; 即当 $P < P_{u1}$ 时, 柱是刚性的, 无变形, 当 $P = P_{u1}$ 时, 两柱底截面均形成塑性铰, 排架柱可维持荷载为常量 P_{u1} 而不断侧移。

结构的一阶刚——塑性分析亦称为“极限分析”(Limit Analysis), 在钢筋混凝土结构中应用时, 应考虑塑性铰极限转角的限制 (见1.2)。

1.1.4 二阶刚——塑性分析

这种分析方法基本上与上述一阶刚——塑性分析方法相同; 即对截面的 $M \sim \varphi$ 关系采用相同的刚——塑性关系, 如图1.2中折线OCD所示; 当荷载 $P < P_{u1}$ 时, 排架不变形 (图1.3中的OE); 当 $P = P_{u1}$ 时, 排架形成可动的机构而不断侧移; 但在建立平衡方程时, 需按柱变形后的轴线 (二阶), 故伴随排架侧移值 Δ 的增长, 荷载 P 值必须不断减小, 才能维持 (不稳定的) 平衡。见图1.1

由柱B

$$0.8HT - XH + P\Delta = M_u$$

及柱A

$$XH + P\Delta = M_u$$

可得

$$P = \frac{M_u}{0.02H + \Delta} \quad (1.7)$$

可见, $P \sim \Delta$ 已非线性关系, 如图1.3中的EIG所示, 当 $\Delta = 0$ 时, $P = M_u / 0.02H = P_{u1}$ (见式1.6)。

在式(1.7)中, 柱截面的极限弯矩 M_u 与轴力 P 及柱顶侧移 Δ 有关, 故必须迭代求解 (见1.2.2)。

1.1.5 一阶弹——塑性分析*

在这种分析方法中, 假设柱截面出铰前 ($M < M_u$) 为弹性; 出铰后 ($M = M_u$), 则为塑性。故其 $M \sim \varphi$ 关系如图1.2中的OAD所示。

对图1.1所示排架, 在柱截面出铰前, 其 $P \sim \Delta$ 关系是一阶弹性的, 见式(1.3)及图1.3中的OJ。因在一阶弹性分析中, 柱各截面轴力相同, 而B柱底截面的弯矩最大, 故应先在此产

* 即一阶理想弹塑性分析。

生塑性铰，设此时的荷载为 P_{1B} 。

由图1.1中的柱B，按静力平衡条件可得

$$\begin{aligned} M_B &= 0.05P_{1B} \times 0.8H - 0.0176P_{1B}H = M_u \\ \therefore P_{1B} &= \frac{M_u}{0.0224H} \end{aligned} \quad (1.8)$$

上式中的 M_u 与轴力 P_{1B} 有关，故需迭代求解（见1.2.3），得

$$P_{1B} = 1547 \text{ kN}$$

相应的 $\Delta = 56.5 \text{ mm}$ ，见图1.3中的J点。

B柱底出铰后，排架可视为静定的弹性结构，其荷载与侧移的增量呈线性关系，直至图1.3中的K点，A柱底也产生塑性铰，排架形成机构而不断侧移，见图1.3中的水平线段KF。

一阶弹——塑性分析所采用的 $M \sim \varphi$ 图形与钢筋混凝土偏心受压截面实际的 $M \sim \varphi$ 曲线（见图1.2中的曲线OBED）已较为接近；但因其分析中未考虑排架结构的几何非线性，故其 $P \sim \Delta$ 图形OJKF与按二阶弹塑性电算分析的 $P \sim \Delta$ 曲线（见图1.3中的虚线），仍相距较远。

1.1.6 二阶弹——塑性分析*

在二阶弹——塑性分析中，所采用柱截面的 $M \sim \varphi$ 关系，与前述一阶弹——塑性分析相同（图1.2中的OAD）；但因在建立静力平衡方程时，需考虑柱侧移的影响，故其 $P \sim \Delta$ 关系在起始的弹性阶段，表现为式（1.5）及图1.3中的曲线OH。当B柱底截面首先产生塑性铰时（按二阶弹性分析，此截面的弯矩值为最大），其荷载 P_{2B} 可求得如下：

由图1.1中的柱B，按静力平衡条件，有

$$\begin{aligned} M_B &= 0.05P_{2B}0.8H - 0.0176P_{2B}H + P_{2B}\Delta = M_u \\ \therefore P_{2B} &= \frac{M_u}{0.0224H + \Delta} \end{aligned} \quad (1.9)$$

上式中的 M_u 值与轴力 P_{2B} 有关，可迭代求解（见1.2.3），得

$$P_{2B} = 1199 \text{ kN}$$

相应的 $\Delta = 73.08 \text{ mm}$ ，见图1.3中的H点。

B柱底出铰后，排架变成静定结构，但因需考虑轴力的二阶效应（简称 $P \sim \Delta$ 效应），故其荷载与侧移的增量呈非线性关系，直至图1.3中的I点，A柱底也产生塑性铰。排架因出二铰而形成机构，其下降段曲线IG，与二阶刚——塑性分析的相同。

由二阶弹——塑性分析所求得的 $P \sim \Delta$ 曲线OHIG与二阶弹塑性电算分析的 $P \sim \Delta$ 曲线（图1.3中虚线）已较为接近。

1.1.7 一阶弹塑性分析

在上述各种分析方法中，对柱截面的 $M \sim \varphi$ 关系，或取 $EI = \text{常量}$ （弹性）或取 $EI = 0$ （塑性）；或取 $EI = \infty$ （刚性）；故其 $M \sim \varphi$ 关系表现为斜直线、水平线或竖直线。实际钢筋混凝土偏压截面的 $M \sim \varphi$ 关系是曲线形的，即属弹塑性，取如图1.2中的曲线OBEF所示。

* 即二阶理想弹塑性分析。

在一阶弹塑性分析中, 其 $M \sim \varphi$ 关系取如图1.2中的曲线 $OBEF$, 或近似取如三折线 $OBEF$, 其计算的 $P \sim \Delta$ 关系, 一般如图1.3中的点划线所示。

1.1.8 二阶弹塑性分析

在二阶弹塑性分析中, 亦采用实际的 $M \sim \varphi$ 关系(图1.2中的曲线 $OBEF$, 或三折线 $OBEF$), 并考虑轴力的二阶效应(几何非线性), 故其计算结果最为符合钢筋混凝土结构的实际工作情况, 见图1.3中的虚线。

因在计算中同时考虑了材料的非线性($M \sim \varphi$ 的曲线关系)及结构的几何非线性, 故由二阶弹塑性电算分析(见3.4, 3.5及6.1)所求得柱的极限荷载 $P_u (=912\text{kN})$ 小于一阶弹——塑性分析的 P_{u1} 及二阶弹——塑性分析的 P_{u2} 。

一、二阶弹塑性分析中的 $M \sim \varphi$ 曲线及 $P \sim \Delta$ 曲线的计算极为复杂, 不可能求得解析解, 一般均用数值法求其近似解。

在以上所述各种分析方法中, 除一阶(线)弹性分析外, 其他各种方法, 均属非线性分析。

1.2 轴力对截面抗弯强度的影响

1.2.1 偏压截面的 $N_u \sim M_u$ 相关图

根据《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)⁽³⁾(以后简称《规范》(GBJ10-89)), 矩形截面偏心受压构件的正截面强度计算图如图1.4所示, 其基本计算公式为

$$N_u = f_{cm}bx + f_y' A_s' - \sigma_s A, \quad (1.10)$$

$$N_u e = f_{cm}bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h - a_s') \quad (1.11)$$

$$e = e_0 + \frac{h}{2} - a_s, \quad e_0 = \frac{M_u}{N_u} \quad (1.12)$$

式中

f_{cm} ——混凝土的弯曲抗压强度;

f_y' ——受压钢筋的屈服强度;

σ_s ——受拉或较小受压边钢筋的应力;

A_s 、 A_s' ——受拉、压区钢筋的截面面积, 其余几何尺寸符号的意义见图。

按平截面变形假定, 大、小偏心受压的界限相对受压区高度 ξ_b 为

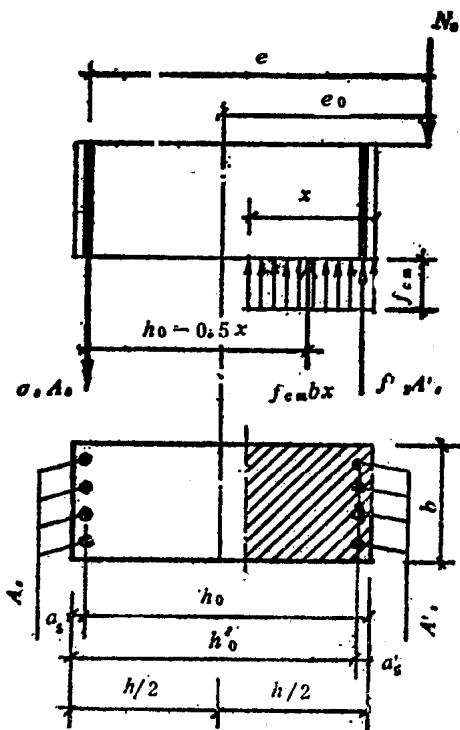


图1.4 偏心受压截面的强度计算图形

$$\xi_b = \frac{0.8}{1 + \frac{f_y}{0.0033E_s}} \quad (1.13)$$

式中 f_y ——受拉钢筋的屈服强度，
 E_s ——钢筋弹性模量。

当 $\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_b$ 时，为大偏心受压，取 $\sigma_s = f_y$ 。

当 $\xi > \xi_b$ 时，为小偏心受压， σ_s 可按下式计算

$$\sigma_s = \frac{\xi - 0.8}{\xi_b - 0.8} f_y \quad (1.14)$$

单层厂房排架柱多采用对称配筋，即 $A_s = A'_s$ ， $f_y = f'_y$ ，其 $N_u \sim M_u$ 关系可按上述基本计算公式求解如下：

若为大偏心受压，即 $x \leq \xi_b h_0$ 时，可取 $\sigma_s = f_y$ ，直接由基本计算公式计算

$$x = \frac{N_u}{bf_{cm}} \quad (1.15)$$

$$\text{及 } M_u = N_u \left(\frac{h}{2} - \frac{N_u}{2bf_{cm}} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (1.16)$$

可见， M_u 与 N_u 是二次函数关系，其图形如图1.5中的曲线段 bc 所示。

若为大偏心受压，但 $x \leq 2a'_s$ ，则应取 $x = 2a'_s$ 及 $\sigma_s = f_y$ ，代入基本计算公式求解

$$x = 2a'_s \quad (1.17)$$

$$M_u = N_u \left(\frac{h}{2} - a'_s \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (1.18)$$

M_u 与 N_u 是线性关系，如图1.5中的直线段 ab 所示。

若为小偏心受压，即 $x > \xi_b h_0$ 时，则应将式 (1.14) 的 σ_s 代入基本计算公式求解 x

$$\begin{aligned} & f_{cm} b x \left(e_0 - \frac{h}{2} + \frac{x}{2} \right) \\ & + f'_y A'_s \left(e_0 - \frac{h}{2} + a'_s \right) \\ & = \sigma_s A_s \left(e_0 + \frac{h}{2} - a'_s \right) \end{aligned} \quad (1.19)$$

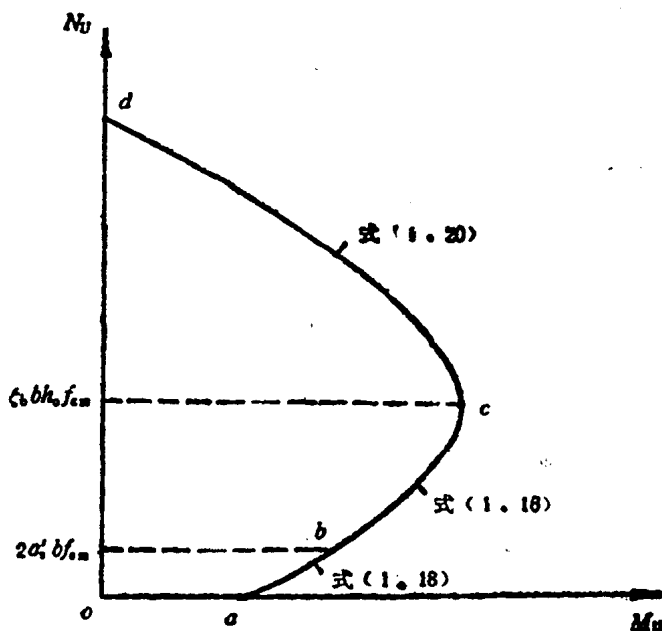


图1.5 对称配筋截面的 $N_u - M_u$ 相关图

$$\text{及 } M_u = -N_u \left(\frac{h}{2} - a_s \right) + f_{cm} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') \quad (1.20)$$

上式中的 x 与 e_0 值有关,故 $N_u \sim M_u$ 也非为线性关系,如图1.5中的曲线段Cd所示。

由图1.5可看出:随轴力 N_u 的增长,大偏心受压截面的抗弯强度 M_u 提高,小偏心受压截面的抗弯强度 M_u 则降低。因大偏心受压时,属受拉破坏;而小偏心受压时,则属受压破坏。

在1.1节所述各种分析方法中,除一、二阶弹性分析外,其他各种方法,都必须考虑轴力对截面抗弯强度的影响。现分述如下:

1.2.2 轴力对刚——塑性分析的影响

在前述一阶刚——塑性分析中,由排架的静力平衡条件(式1.6),可得

$$e_0 = \frac{M_u}{P_{u1}} = 0.02H = 0.02 \times 7500 = 150\text{mm}$$

该排架的

$$b = 350\text{mm}, h = 450\text{mm}, a_s = a_s' = 35\text{mm}; h_0 = h - a_s = 415\text{mm},$$

$$A_s = A_s' = 1256\text{mm}^2, f_y = f_y' = 340\text{N/mm}^2, f_{cm} = 15\text{N/mm}^2, E_s = 200\text{kN/mm}^2,$$

由式(1.13),可得 $\xi_b = 0.528$ 。

设为小偏心受压⁽⁴⁾⁽⁵⁾,将以上各值代入式(1.14)及式(1.19),可解得

$$x = 275\text{mm} > \xi_b h_0 = 219\text{mm} \text{ (实属小偏压)}$$

将 e_0 及 x 值代入式(1.20),即可求得

$$P_{u1} = 1656\text{kN} \text{ 及 } M_u = P_{u1} e_0 = 248\text{kNm}$$

在前述二阶刚——塑性分析)

中,由排架的静力平衡条件(式1.7

可得

$$e_0 = \frac{M_u}{P} = 0.02H + \Delta$$

当为小偏心受压($P > f_{cm} \xi_b b h_0 = P_{u1} = 1656$
= 1150kN)时

以 $e_0 = 0.02H + \Delta$ 代入式

(1.19)及式(1.20),可求得 $P \sim \Delta$
关系。

当为大偏心受压($P \leq 1150\text{kN}$)

时

以 $e_0 = 0.02H + \Delta$ 代入式(1.15)

及式(1.16),可求得 $P \sim \Delta$ 关系。

按以上分析(考虑轴力的影响)所求得下降段的 $P \sim \Delta$ 曲线,如图1.3中的曲线EIG,或图1.6中的实曲线所示。

*在分析中,取用了材料的标准强度值。

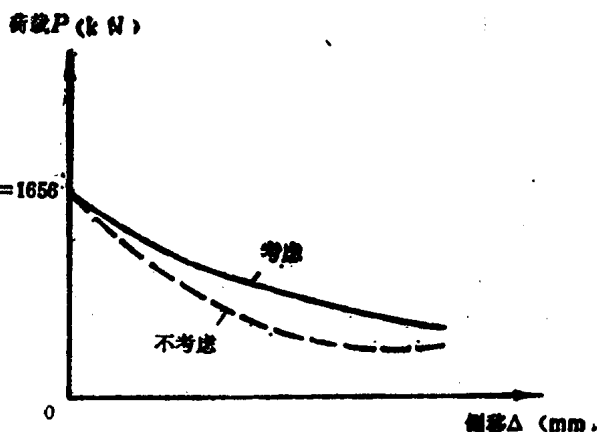


图1.6 轴力对二阶刚——塑性分析的影响

若在上述二阶刚——塑性分析中,不考虑轴力对截面抗弯强度 M_u 的影响,取 M_u 为 P_{u1} 时的常量 $M_u = 248\text{kNm}$,将此 M_u 值代入式(1.7),可直接求得下降段的 $P \sim \Delta$ 关系,如图1.6中的虚曲线所示。当荷载 P 值相同时,考虑轴力的影响,截面的抗弯强度 M_u 值将提高,故其相应的 Δ 值(见式1.7)也较大。

1.2.3 轴力对弹——塑性分析的影响

在前述一阶弹——塑性分析中,当 B 柱底出铰时,由排架的静力平衡条件(式1.8),可得

$$e_0 = \frac{M_u}{P_{1B}} = 0.0224H = 0.0224 \times 7500 = 168\text{mm}$$

设为小偏心受压(即设 $P_{1B} > 1150\text{kN}$),则将此 e_0 值代入式(1.19),可解得

$x = 263\text{mm}$;代入式(1.20),即可求得

$$P_{1B} = 1547\text{kN} \text{ 及 } M_u = P_{1B} \cdot e_0 = 260\text{kNm}$$

相应的柱顶侧移,按式(1.3)为

$$\Delta = 56.5\text{mm}$$

即图1.3中的 J 点。

B 柱底出铰后,排架成静定结构(图1.7)

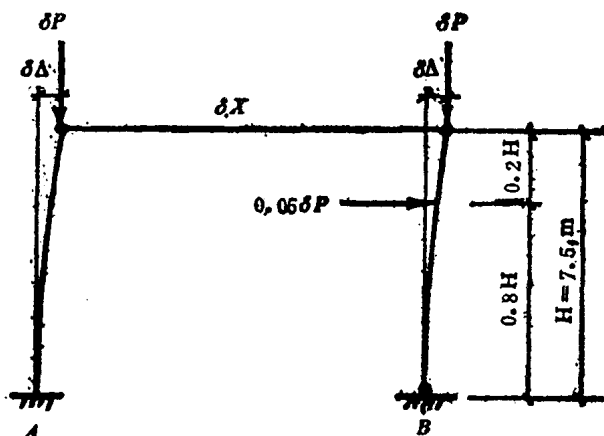


图1.7 排架分析简图(B 柱底出铰后)

$$\text{由 } \Sigma M_B = 0$$

$$\delta X = 0.05 \delta P \times 0.8 = 0.04 \delta P$$

由柱 A

$$\delta \Delta = \frac{\delta X H^3}{3EI} = 8.3 \times 10^{-5} \delta P$$

故荷载增量 δP 与侧移增量 $\delta \Delta$ 成线性关系。

从 B 柱出铰至 A 柱出铰形成机构,其荷载增量为

$$\delta P = P_{u1} - P_{1B} = 1656 - 1547 = 109\text{kN}$$

由此可得

$$\delta \Delta = 8.3 \times 10^{-5} \delta P = 9.05\text{mm}$$

$$\text{及 } \Delta = 56.5 + 9.05 = 65.6\text{mm}$$

即图1.3中的 K 点。过 K 点,排架因已形成机构而不断侧移,即图1.3中的水平线段 kP 。

若在上述一阶弹——塑性分析中,不考虑轴力对截面抗弯强度 M_u 的影响,并取 M_u 为 P_{u1} 时的常量,即